

Stanisław POŁOSZYK, Leszek RÓŻAŃSKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA
INSTYTUT TECHNOLOGII MECHANICZNEJ

Termowizyjna diagnostyka maszyn technologicznych

Dr inż. Stanisław Połoszyk

emetytowany docent kontraktowy. Wydział Elektryczny Politechniki Poznańskiej ukończył w 1950 r. Doktoryzował się na tym wydziale w 1973 r. W latach 1974-1990 był zastępcą dyrektora Instytutu Elektroniki Politechniki Poznańskiej. Zajmuje się konstrukcją i technologią elektronicznej aparatury pomiarowej oraz jej aplikacjami ze szczególnym uwzględnieniem termowizji. Jest autorem i współautorem kilkudziesięciu przyrządów. Opublikował 45 prac naukowych.



Dr inż. Leszek Różański

ukończył automatykę i metrologię elektryczną na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej oraz fizykę na Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Autor kilkudziesięciu prac naukowych. Zajmuje się teorią i konstrukcją systemów zobrazowania termalnego, diagnostyką termowizyjną oraz zastosowaniami systemów wizyjnych w metrologii wielkości geometrycznych.



Streszczenie

W pracy omówiono istotę oraz uwarunkowania termowizyjnych metod badawczych. Opisano towarzyszące pracy maszyn technologicznych zjawiska cieplne decydujące o nagrzewaniu oraz odkształceniach cieplnych zespołów tych maszyn. Przedstawiono komputerowo wspomaganie stanowisko przeznaczone do diagnozowania stanów technicznych wybranej grupy maszyn technologicznych oraz opisano strukturę tego stanowiska. Jego zasadniczą część stanowi multispektralny termalno-wizyjny system pomiarowy zrealizowany na bazie opracowanego i wykonanego na Politechnice Poznańskiej termografu TE-93. Podano metodykę diagnozowania maszyn technologicznych, której istotą jest komparacja stanów zarejestrowanych ze stanami uznanymi za wzorcowe. Wskazano, iż termografia może być przydatna w badaniach prototypów, w badaniach odbiorczych maszyn nowo instalowanych, a także może być stosowana do dokonywania badań stanów technicznych maszyn będących w eksploatacji.

Abstract

An idea and conditions of thermovision investigation methods have been described in the paper. The thermal phenomena influencing the thermal deformations of machine tools have been also presented. The computer aided stand for technical state diagnosis of the chosen technological machines as well as the structure of such stand have been shown. The main part of the stand is the multispectral thermovision measuring system that has been based on the thermograph TE-93 (designed and manufactured in Poznan University of Technology). The essential idea of the technological machine diagnosis method is the comparison of the registered states with those treated as the standard ones. It has been proved that the thermography can be useful for prototype investigations, for testing the new installed machines and for checking the machines during their exploitation time.

WSTĘP

Badania intensywności zjawisk cieplnych towarzyszących pracy obrabiarek dawno uznane zostały jako wysoce przydatne dla oceny poprawności ich działania. Podstawowym warunkiem przydatności wyników tych badań jest umiejętność przeprowadzenia wnioskowania diagnostycznego na podstawie analiz obrazów termalnych odpowiednich powierzchni korpusów obrabiarek. Analiza obrazów termalnych może być bowiem bogatym źródłem informacji

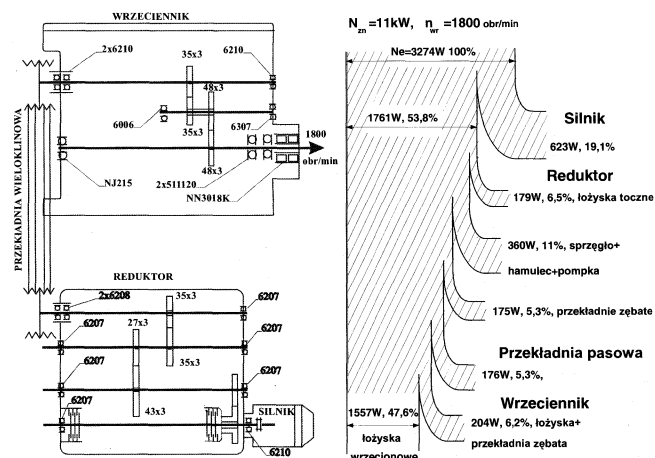
o stanie technicznym obrabiarki, jakości wykonania i montażu par kinematycznych, stanowiących obciążenie cieplne korpusów a także źródłem informacji o cechach obrabiarki, decydujących o jej funkcjach użytkowych [4].

Podstawową funkcją obrabiarek jest wykonywanie przedmiotów o założonej dokładności wymiarowo-kształtowej z określoną wydajnością. Dokładność tę determinują przede wszystkim niezamierzone przemieszczenia względne narzędzia i przedmiotu obrabianego, o których rozstrzygają własności cieplne samej obrabiarki, jak i parametry skrawania. Dominujący udział, dochodzący nawet do 60 % całkowitych przemieszczeń względnych narzędzia i przedmiotu, mają przemieszczenia wywołane odkształceniami cieplnymi korpusów.

Metodyka diagnozowania obrabiarek, wykorzystująca zjawiska cieplne towarzyszące pracy obrabiarek, musi bazować na szczegółowej wiedzy o tych zjawiskach oraz wiedzy o związkach między stanem technicznym elementów i zespołów obrabiarek a jej stanem termicznym.

ZJAWISKA CIEPLNE W OBRABIARKACH

Nagrzewanie obrabiarki jest wynikiem powstających w obrębie obrabiarki strat mocy. Efektem działania ciepła na konstrukcję są odkształcenia jej zespołów składowych. Odkształcenia te mogą powodować:



Rys. 1. Bilans strat energetycznych napędu głównego tokarki TUR

- pogarszania funkcji sterowniczych obrabiarki, a w szczególności dokładność ustalania położenia;
- znaczne wzajemne przemieszczenia zespołów roboczych, a tym samym zmieniać stereometrię;
- nadmierne opory ruchu elementów i pogarszać właściwości ruchowe zespołów;
- dodatkowe powiększanie straty mocy.

Źródła ciepła

Rozmieszczenie źródeł ciepła w obrabiarence oraz ich wydajności wpływają bezpośrednio na jej odkształcenia cieplne, a tą drogą oddziałują na dokładność wymiarowo-kształtową obrabianych przedmiotów. Wysoka dokładność obrabiarki wyrażająca się niezmiennością jej geometrii, wymagana jest zwłaszcza do przeprowadzania obróbki wykańczającej, czyli w warunkach pracy nieznacznie odbiegających od biegu luzem. Przy takim założeniu można pominąć ciepło powstające w strefie skrawania, ograniczając się do źródeł ciepła rozmieszczonych wewnątrz korpusów obrabiarek jak i znajdujących się poza tymi korpusami a oddziałującymi na nie poprzez konwekcję, promieniowanie bądź przewodzenie. Są to najczęściej elementy układów kinematycznych napędów głównych i posuwowych jak: silniki, łożyska, przekładnie zębate i pasowe, sprzęgła i hamulce oraz elementy układów hydraulicznych i pneumatycznych jak: siłowniki, pompy, dławiki, rozdzielacze itp.

Udział poszczególnych źródeł ciepła w całkowitym bilansie energetycznym jest zróżnicowany w zależności od rodzaju źródła, warunków jego pracy oraz rozwiązania konstrukcyjnego obrabiarki [1]. W przykładowej strukturze kinematycznej napędu tokarki (rys.1) źródła ciepła rozmieszczone są częściowo w obrębie wrzeciennika tokarki oraz w reduktorze umieszczonym pod wrzeciennikiem, a także w zespole przekładni pasowej jak i w zespole silnika znajdującym się poza tymi korpusami. Bilans energetyczny wyznaczony dla powyższego napędu wskazuje na bardzo duży udział łożysk wrzeciona w sumarycznych stratach mocy. Udział ten zależy od złożoności struktury kinematycznej napędu i na ogół jest większy w nowoczesnych napędach bezstopniowych o prostej konstrukcji kinematycznej.

Poważnym źródłem ciepła są też straty mocy w samych silnikach elektrycznych. Na ogół jednak silniki te znajdują się na zewnątrz korpusów obrabiarkowych i tylko niewielka część strumienia ciepła przekazywana jest do korpusów obrabiarek na drodze konwekcji, promieniowania i przewodzenia. Wielkość strat w silniku zależy od jego sprawności mechanicznej i elektrycznej, która jest funkcją obciążenia silnika oporami ruchu w napędzie i ewentualnie mocą skrawania. Zbyt duża moc pobierana przez silnik, a tym samym podwyższona temperatura pracy przy stałych oporach ruchu w pozostałej części napędu, może świadczyć o awarii uzwojeń silnika, zbyt małej szczeliny między wirnikiem a stojanem (np. w wyniku zwiększenia się luzów w łożyskach) bądź o zacieraniu się łożysk wirnika.

Asortyment łożysk tocznych stosowanych w obrabiarkach jest bardzo zróżnicowany w zakresie ich wielkości, typu, a także charakteru obciążenia. W większości łożysk znajdujących się w układach kinematycznych obrabiarki, zmiany wymiarowe będące wynikiem nagrzewania się elementów węzła łożyskowego są zbyt małe, aby mogły doprowadzić do wytworzenia się luzu ujemnego. W takich łożyskach występuje luz dodatni i nie ma obciążenia wewnętrznego. Jeżeli jednak temperatura pracy łożyska jest odpowiednio wysoka lub konstrukcja łożyska (np. łożyska skośne) wymaga napięcia wstępnego, to podczas pracy mogą wystąpić w tych łożyskach duże obciążenia wewnętrzne a tym samym duże straty mocy. Ma to miejsce zwłaszcza w łożyskach wrzecionowych, montowanych z uwagi na sztywność wrzecion z małymi luzami, bądź z napięciem wstępnym [2]. Stan termiczny łożyskowych węzłów wrzecionowych określony jest przez złożony układ powiązanych czynników związanych z:

- typem, wielkością i warunkami pracy łożysk, do których należą: własności czynnika smarującego, luzy pomontażowe, prędkości obrotowe, warunki obciążenia;
- warunkami przekazywania ciepła;
- sprężystymi i cieplnymi właściwościami elementów składowych węzłów;

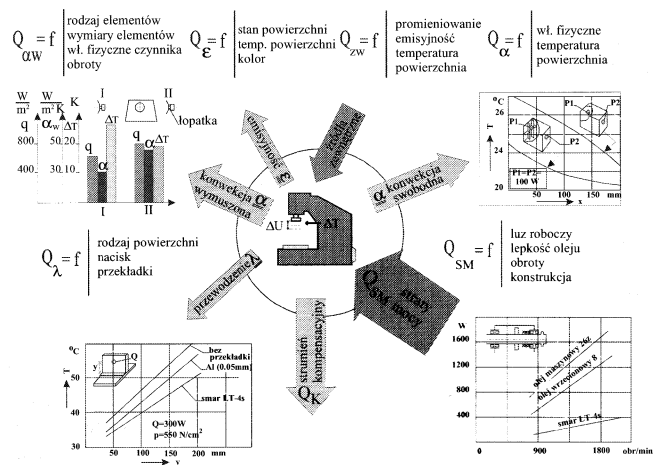
- wielkością i kształtem elementów składowych zespołu wrzecionowego.

Zwiększone straty mocy w łożyskach mogą być wynikiem: zbyt dużych napięć wstępnych lub zbyt małych luzów ustawionych w montażu, niewłaściwej lepkości zastosowanego oleju, mieszaniami oleju i smaru w przypadku łożysk smarowanych smarem plastycznym, źle przeprowadzonym cyklem tzw. układania się smaru w łożyskach świeżo uzupełnionych smarem bądź też istotną zmianą warunków wymiany ciepła w obrębie węzła łożyskowego.

Straty mocy w przekładniach zębatych są, podobnie jak w łożyskach, sumą strat hydrodynamicznych i strat od obciążenia. Obciążenie przenoszone przez przekładnie zębate jest wynikiem obciążenia napędu siłami skrawania, co praktycznie nie wpływa na obciążenie łożysk. Ze wzrostem mocy skrawania intensywnie rosną straty w przekładniach zębatych, choć same przekładnie mają bardzo dużą sprawność. Natomiast straty mocy w łożyskach wałków, na których osadzone są te przekładnie, nie zależą od mocy przenoszonej przez napęd. W warunkach biegu luzem, gdy obciążeniem przekładni są tylko opory ruchu par kinematycznych, składnik strat mocy od obciążenia praktycznie nie występuje. Z tego powodu w bilansie strat mocy udział przekładni zębatych jest niewielki. Zwiększone straty mocy w przekładniach zębatych mogą wynikać: ze zbyt małych luzów międzyzębnych, złego rozstawu osi wałków, ukosowania osi wałków, zbyt dużej chropowatości powierzchni zębów, zbyt dużej lepkości oleju smarującego, bądź zbyt obfitego smarowania. W skrzynkach prędkości obrabiarek bardzo często stosowane są sprzęgła i hamulce elektromagnetyczne. W stanie załączonym starty mocy w sprzęgle są tylko wynikiem mocy elektrycznej pobieranej przez uzwojenia. W stanie rozłączonym wynikają z magnetyzmu szczątkowego i tarcia między płytkami zwilżonymi olejem. Wielkość strat energetycznych zmienia się w zależności od przenoszonego momentu i dla poszczególnych typów sprzęgieł jest różna. Zwiększone straty mocy w sprzęgle, oprócz przypadków jego przeciążenia, mogą wynikać: ze zbyt małego luzu osiowego ustawionego w montażu, ze zbyt obfitego smarowania sprzęgła bądź też ze złej jakości samych płytek.

Bilans strumieni ciepła w obrabiarence

Stan cieplny obrabiarki, określony rozkładami temperatury na poszczególnych powierzchniach korpusów, jest wynikiem złożonych oddziaływań strumieni ciepła, dostarczanych do obrabiarki i przekazywanych z niej do otoczenia. W sposób poglądowy zaznaczono na rys.2 udział poszczególnych rodzajów strumieni i ich możliwych zmian w drodze doboru warunków pracy zespołów napędowych i warunków przekazywania ciepła. O wartości strumienia ciepła QSM rozstrzygają straty mocy w źródłach ciepła rozmieszczonych w obrabiarence jak: silniki, łożyska, sprzęgła, przekładnie pasowe i zębate, cierne pary kinematyczne oraz inne źródła ciepła jak: pompy, elementy elektryczne i elektroniczne itp.

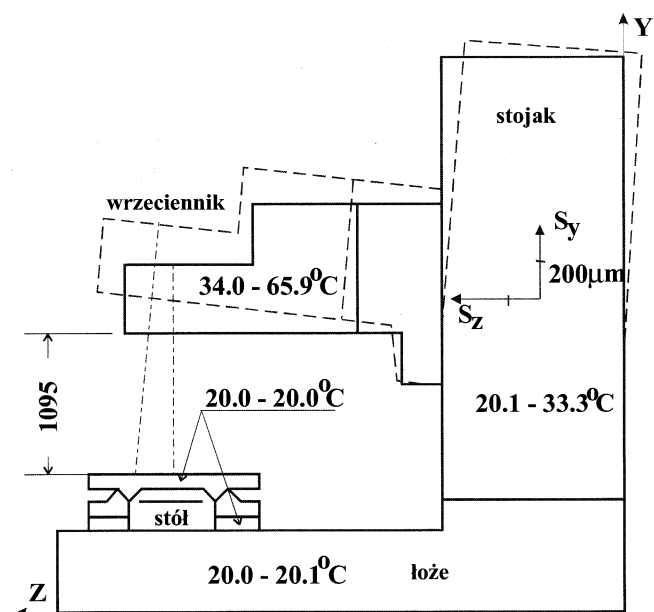


Rys. 2. Bilans strumieni ciepła działających na obrabiarence

Na poziom temperatur i ich rozkład zasadniczy wpływ ma rozmieszczenie i wydajność źródeł ciepła oraz intensywność strumieni przekazywanych do otoczenia. Największy udział w przekazywaniu ciepła stanowi konwekcja wymuszona (strumień Q_{α_w}), a następnie konwekcja swobodna (strumień Q_{α}), emisja ciepła (strumień Q_E) i wreszcie przewodzenie do podłoża ujęte strumieniem Q_{λ} . Dokładne określenie tych udziałów jest bardzo trudne, gdyż - jak to zaznaczono na rysunku - poszczególne strumienie zależą od wielu czynników oraz istniejących wzajemnych sprzężeń. Konwekcja swobodna odgrywa dużą rolę przede wszystkim w korpusach o znacznych wymiarach lub w korpusach silnie nagrzewających się jak np. wrzeciennikach [3]. Dla powierzchni o wysokim poziomie nagrzania istotny może być również strumień ciepła przekazywany do otoczenia na drodze promieniowania. Niekiedy porównywalny ze strumieniem wywołanym konwekcją swobodną.

STAN CIEPLNY OBRABIARKI

Rozkład temperatury, który wytworzy się na ściankach i wewnątrz korpusów obrabiarek jest wynikiem jednoczesnego oddziaływania wszystkich strumieni ciepła wytwarzanych w obrabiarence i z niej odprowadzanych na drodze konwekcji, promieniowania i przewodzenia. W zależności od poziomu nagrzania i pozostałych warunków jak: warunki konwekcji wymuszonej, warunki smarowania, sposób łączenia korpusów, własności emisyjne lakierów pokrywających korpusy, występowanie nadlewów i żeber na zewnętrznych i wewnętrznych ściankach korpusów itd., stabilność termiczna obrabiarki może być bardzo zróżnicowana. Poziom nagrzewania się korpusów obrabiarek jest bardzo niejednorodny. Najwyższe temperatury występują w obrębie wrzecienników (rys.3) a wpływ tych temperatur na dokładność obrabiarki, wyznaczaną przez przemieszczenia osi wrzeciona względem stołu, zależy od struktury obrabiarki i jej wymiarów geometrycznych. Niewielkie nawet odkształcenie wysokich stojaków może być przyczyną znacznych błędów obrabiarki.

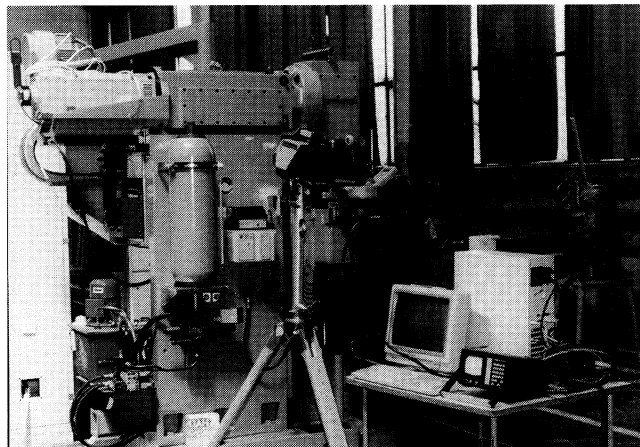


Rys. 3. Porównanie nagrzewania się zespołów frezarki pionowej

STANOWISKO TERMOGRAFICZNEJ DIAGNOSTYKI MASZYN

Na bazie opracowanego w Politechnice Poznańskiej Systemu Termograficznego TE-93 [6] stworzono stanowisko (sprzęt i

oprogramowanie) do termograficznej diagnostyki maszyn [7]. Pozwala ono, na podstawie obrazów termalnych, analizować stany cieplne maszyn i ich podzespołów oraz ustalać związki między stanem badanej maszyny a jej obrazem termalnym. Zintegrowana z kamerą TE-93 kamera video tworzy multispektralny, termalno-wizyjny system pomiarowy (rys. 4) i w znaczącym stopniu ułatwia lokalizację izoterm na badanym obiekcie.



Rys. 4. Stanowisko termograficznej diagnostyki maszyn

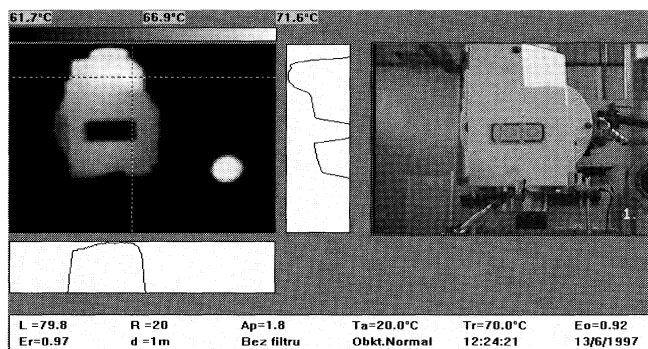
Komputerowe wspomaganie diagnostyki termograficznej realizowane jest sprzętowo (specjalizowany mikrokomputer, komputer klasy IBM PC) oraz programowo w zakresie sprzętu pomiarowego (sterowanie funkcjami pomiarowymi, zapisem obrazu itp.) i oprogramowania służącego do analizowania obrazów termalnych. Do procedur realizowanych programowo na stanowisku należą:

- pobieranie z kamery termalnej i wyświetlanie na ekranie komputera pojedynczych obrazów lub ich sekwencji; przetwarzanie - paletowanie - zmiana kolorów i odcieni, odczytanie wartości temperatury dla dowolnie wybranego punktu, wyświetlanie rozkładu temperatury dla dowolnego przekroju, powiększanie wybranego fragmentu, nanoszenie i edycja komentarzy, zapis/odczyt na dysku lub innym nośniku danych itp.;
- wczytywanie i wyświetlanie na monitorze komputera obrazów (sekwencji obrazów) pobranych z kamery video oraz podstawowe funkcje obróbki tego typu obrazów - skalowanie, konwersja obrazów kolorowych na czarno-białe, zapis i odczyt na dysk, eksport uzyskanych w ten sposób obrazów do popularnych formatów plików graficznych w celu umożliwienia ich obróbki przez inne, specjalizowane oprogramowanie;
- zaawansowane funkcje obróbki obrazów termalnych i optycznych - filtrowanie, wyznaczanie histogramów, rozkłady 3D, odsumianie, korekcja geometryczna i nakładanie obrazów termalnych na optyczne i odwrotnie, kontrastowanie, konturowanie (rys.5);
- funkcje metrologiczne - wyznaczanie emisyjności i temperatury, możliwość zmian definiowania krzywej kalibracji, korekcja pomiaru z uwzględnieniem transmisji środowiska, uwzględnianie parametrów kamery i środowiska: różne obiektywy, apertura, temperatura otoczenia, emisyjność obiektu i źródła referencji, kalibracja kamery.

METODYKA BADAŃ

Wyniki badań prowadzonych na stanowisku pozwalają na opracowanie reguł decyzyjnych służących do diagnozowania stanów wybranych grup obrabiarek. W oparciu o zbierane dane empiryczne

tworzone są algorytmy rozpoznawania, selekcji cech i doboru logiki decyzyjnej. Z podstawowych klas opisujących stan badanych maszyn (sprawny, niesprawny) wyodrębnione zostają podklasy, które opisują charakter niesprawności (podklasy: rodzaj, intensywność) lub stan obiektu sprawnego (podklasy określają np. czas, w którym możemy oczekiwać sprawnej pracy maszyny).



Rys. 5. Obraz z kamery termalnej i obraz z kamery video

Ze względu na oddziaływanie licznych wielkości wpływowych wyniki badań empirycznych mają sens realizacji zmiennych losowych. Charakter zadań badawczych sprawia, że diagnozowanie termograficzne obrabiarek jest dokonywane w oparciu o reguły rozpoznania wieloetapowego. Istotny problem stanowi tutaj zagadnienie estymacji oryginalnych obrazów termograficznych w oparciu o dane dotyczące danego obiektu oraz dane określające efekty degradacyjne wnoszone przez poszczególne węzły systemu termograficznego. Pomocne w rozwiązaniu tego problemu jest stanowisko pomiarowe do wyznaczania funkcji LSF i MTF termografu. Rozpoznawanie obrazów dokonywane zostaje w oparciu o znane metody segmentacji wyznaczania cech i lokalizacji obiektów. Analiza termogramów bazuje na znanych algorytmach uwzględniających właściwości emisyjne obiektu i wzorca referencyjnego, temperaturę otoczenia, rozmiary obiektu, tłumienność atmosferyczną itd. Wymienione elementy procesu diagnozowania pozwalają na tworzenie komputerowej bazy danych, gromadzącej informacje o stanach termicznych wybranej grupy maszyn. Komparacja stanu wzorcowego ze stanem zarejestrowanym, dokonana w oparciu o wypracowane reguły i algorytmy diagnozowania, prowadzi do określenia stanu badanej obrabiarki. Działanie takie dotyczy tych klas maszyn, dla których możliwe jest zarejestrowanie obrazów wzorcowych (głównie maszyn produkowanych seryjnie).

W pracy [5] opisano algorytm tworzenia procedur termowizyjnych badań diagnostycznych oraz procedury, w których punktem odniesienia są stany maszyn uznane za wzorcowe. Wyznacza się dla nich wzorcowe obrazy termalne, wzorcowe wskaźniki stanu oraz określa dopuszczalne odstępstwa od tych stanów. Procedury te dotyczą:

- sprawdzania zwartości i kierunku przemieszczeń wrzeciona,
- sprawdzania stanów cieplnych obrabiarek,
- sprawdzania stabilności termicznej obrabiarek,
- sprawdzania sztywności zespołów wrzecionowych.

WNIOSKI KOŃCOWE

1. Przeprowadzone badania wykazały, że termowizja może być skutecznie aplikowana w diagnostyce technicznej maszyn technologicznych. Symptomami diagnostycznymi, niosącymi informacje o stanach technicznych maszyn, są obrazy termalne podzespołów decydujących o poprawności ich działania. Zastosowanie systemu multispektralnego termalno-wizyjnego, umożliwiającego jednoczesne wizowanie obiektów w podczerwieni

i świetle widzialnym, w zdecydowany sposób ułatwia lokalizację miejsc występowania anomalii termicznych. Zdobyte doświadczenia (również w warunkach przemysłowych) pokazują, że termowizja jest szczególnie dobrze „predysponowana” do wykorzystania jej w diagnostyce termicznej obrabiarek.

2. Wyniki badań termowizyjnych maszyny technologicznej mogą być punktem wyjścia do tworzenia „termalnej historii maszyny”, zapisanej w postaci termogramów stanowiących elementy odpowiednio zorganizowanej „obrazowej” bazy danych. Poszczególne termogramy przewidziane do umieszczenia w takiej bazie powinny być rejestrowane na tych wszystkich etapach „życia maszyny”, które konstruktorzy oraz diagnosty uznają za ważne. Tak stworzoną bazę można wykorzystać do oceny zdadności lub braku zdadności wszystkich innych maszyn tego samego typu oraz dość precyzyjnie określić czas po jakim należy maszynę remontować lub dokonać jej wymiany.

3. Zastosowanie multispektralnych systemów termalno-wizyjnych w diagnostyce technicznej maszyn technologicznych może w znacznym stopniu ograniczyć potrzebę stosowania kosztownych procedur diagnostycznych, opierających się na wynikach pomiarów, które bazują na tradycyjnych metodach wykorzystywanych w metrologii wielkości geometrycznych, wibroakustyce, ferrografii oraz spektroskopii.

4. Można wyróżnić cztery główne obszary szerokiego zastosowania pomiarów termowizyjnych do optymalizowania działań związanych z konstruowaniem i eksploatacją maszyn technologicznych. Są to: proces projektowania i badań prototypów, badania odbiorcze przy instalowaniu maszyn, dozór i diagnozowanie nieprawidłowej pracy oraz kompensacja zakłóceń cieplnych (i związanych z nimi przemieszczeń).

LITERATURA

- [1] J. JĘDRZEJEWSKI, K. BUCHMAN, W. KWAŚNY: Analityczne określanie strat energetycznych w łańcuchach kinematycznych napędów głównych. Materiały Sympozjum Naukowego pt. „Obrabiarki i obróbka skrawaniem”. Politechnika Łódzka, Łódź 1970. ss. 20-44.
- [2] J. JĘDRZEJEWSKI, W. KWAŚNY, J. POTRYKUS: Beurteilung der Berechnungsmethoden für die Bestimmung der Energieverluste in Walzlagern. Schmierungstechnik. JG. 20, Nr 8, 1989. ss. 243-244.
- [3] J. JĘDRZEJEWSKI, J. KACZMAREK, B. REIFUR: Description of the forced convection along the walls of machine - tool structures. Annals of the CIRP. Vol. 37/1/1988. ss. 397-400.
- [4] W. KWAŚNY, S. POŁOSZYK: Sygnały cieplne obrabiarek w diagnostyce termograficznej. Materiały II Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej. Diagnostyka Procesów Przemysłowych. Łągow 1997. ss. 375-380.
- [5] W. KWAŚNY, S. POŁOSZYK, L. RÓŻAŃSKI: Metodyka termowizyjnych badań diagnostycznych maszyn technologicznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Mechanika 63. Kielce 1997. ss. 171-177.
- [6] S. POŁOSZYK, L. RÓŻAŃSKI: Komputerowe wspomaganie procesów diagnozowania za pomocą Systemu Termograficznego TE-93. MKW'95. Zegrze k. Warszawy 1995. T.3 ss. 351-352.
- [7] S. POŁOSZYK, L. RÓŻAŃSKI: Thermographic Diagnosis Station of Machines. 7th International DAAAM Symposium. Vienna 1996. ss. 351-352.

Praca realizowana w latach 1995-1998 w ramach grantu KBN T-07/95/09 „Metodyka i system diagnozowania termograficznego stanu technicznego maszyn technologicznych”. Kierownik tematu: S. Poloszyk